

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ – КАК ВЫБРАТЬ ЛУЧШИЙ МЕТОД

Д. Моррис david\_morris@agilent.com

По мере усложнения интегральных схем (ИС) требуются все более точные методы для их проектирования. К таким методам относится расчет электромагнитных (ЭМ) полей в объеме, занимаемом ИС. За последние годы было предложено несколько технологий ЭМ-моделирования. Для решения определенной задачи, как правило, наиболее эффективна какая-то одна из технологий. О том, как ее правильно выбрать, рассказывается в статье.

## ДЛЯ ЧЕГО НУЖНО ЭМ-МОДЕЛИРОВАНИЕ

Хотя в это трудно поверить, но в последние 25 лет применение средств автоматизированного проектирования для анализа ВЧ- и СВЧ-цепей составляло лишь малую часть общего процесса проектирования. За эти годы технологии стремительно совершенствовались, в результате чего произошла эволюция компьютерных платформ от больших ЭВМ коллективного пользования до современных сверхмощных рабочих станций. Столь значительное повышение вычислительной мощности компьютеров предоставило разработчикам САПР прежде недоступные возможности моделирования. И в первую очередь это относится к расчетам электромагнитного поля, где были значительные проблемы, связанные с численным решением уравнений Максвелла.

Прежде чем погрузиться в детали электромагнитного моделирования, следует подчеркнуть, что фактором, зачастую ограничивающим применение современных средств моделирования, является вовсе не их производительность, а скорее, недостаточная точность и пригодность моделей. Вообще говоря, компоненты типичного ВЧ/СВЧ или высокоскоростного цифрового устройства можно разделить на "активные" и "пассивные". В идеальном случае все активные устройства представлялись бы "нелинейными" моделями, демонстрирующими идентичные характеристики и во время моделирования, и во время измерения (в широком диапазоне возможных рабочих режимов). Все пассивные компоненты описывались бы "линейными"

моделями, сохраняющими точность во всем диапазоне возможных режимов работы. До такого идеала еще далеко, но, к счастью, существует немало практических решений, существенно облегчающих процесс проектирования. Например, в течение многих лет нелинейные модели разрабатывались на основе математического описания устройств (компактные модели), а с недавнего времени все большую популярность приобретают модели на основе измерения нелинейных параметров, таких как X-параметры и S-функции.

Моделирование пассивных устройств выполняется значительно проще в связи с тем, что они имеют линейную природу и в результате их поведение обычно не зависит от внешних факторов, например от подачи ВЧ-сигнала. Для проектирования ВЧ-устройств пассивные компоненты можно разделить на компоненты с сосредоточенными параметрами (резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы и др.), и компоненты с распределенными параметрами (например, микрополосковые линии). В САПР обычно предлагаются готовые модели компонентов с сосредоточенными параметрами – либо в виде базовых элементов общих библиотек, либо в составе специальных библиотек изготовителя. Поставщики САПР обычно также включают в комплект поставки библиотеки стандартных элементов для моделирования компонентов с распределенными параметрами, например, библиотеку элементов микрополосковых линий. Поведение

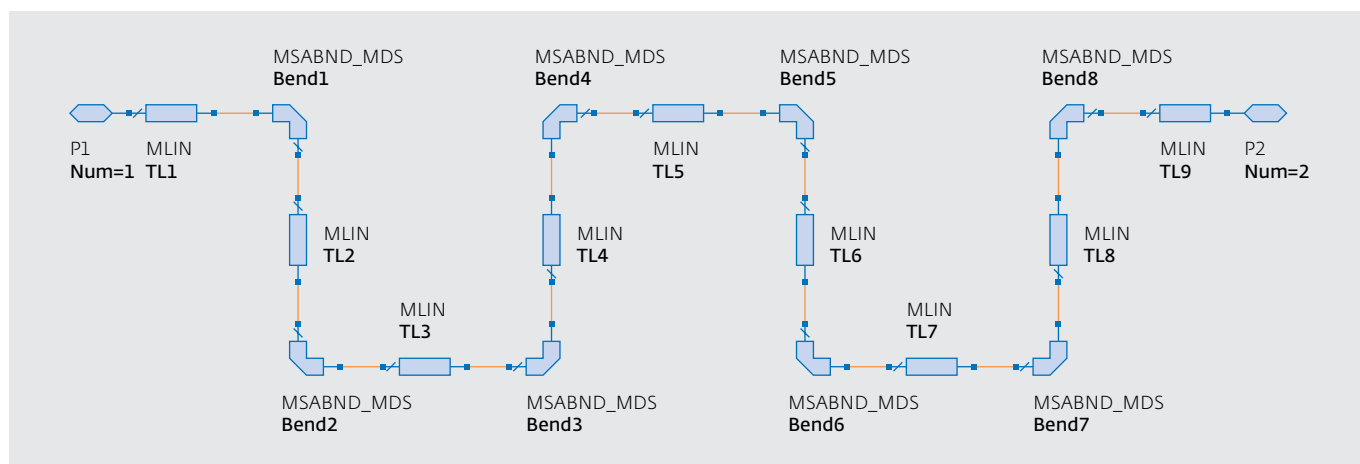


Рис.1. Схематическое представление 50-омной микрополосковой линии в виде меандра длиной 500 mil

таких компонентов описывается, как правило, замкнутой аналитической моделью (основанной на математическом описании). Эти модели дают очень полезную начальную точку для создания новых схем и могут применяться для разных целей. Однако важно знать некоторые присущие им ограничения. Например, каждая модель рассчитывается автономно без учета взаимодействия (например, электромагнитного) с другими элементами конструкции. Чтобы проиллюстрировать сказанное, рассмотрим пример с микрополосковой линией в виде меандра длиной 0,5 дюйма, расположенной на подложке из оксида алюминия толщиной 10 mil (рис.1).

При расчете этой схемы каждый компонент микрополосковой линии моделируется независимо и просто соединяется последовательно с соседними компонентами через определенные на схеме узлы. В этой модели не учитываются паразитные электромагнитные связи между компонентами (например, в данном случае не учитываются связи между компонентами TL2 и TL4). Понятно, что точность такой модели зависит от соотношения сторон меандра.

Для реализации микрополосковой линии могут использоваться три совершенно разные структуры (рис.2). Интуитивно можно предположить, что самой большой паразитной связью между секциями обладает "сжатый меандр", а самой малой – "прямая линия".

Все эти три конфигурации были смоделированы по схематической модели и по модели, основанной на расчете ЭМ-полей. Результаты моделирования подтверждают, что по мере "растяжения" меандра паразитная электромагнитная связь уменьшается и характеристики

"схематической модели" и "ЭМ-модели" сближаются (рис.3).

Хотя пример с линией в виде меандра довольно искусственный, он наглядно иллюстрирует, что по мере роста плотности соединительных линий на печатных платах и на подложках ИС вероятность возникновения паразитных электромагнитных связей между компонентами возрастает.

## ОБОБЩЕННЫЙ ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Главной задачей электромагнитного симулятора является поиск приближенного решения уравнений Максвелла, отвечающих заданным граничным и начальным условиям. За последние 20 или 30 лет для этого было предложено несколько методов. Учитывая широкий спектр проблем, которые могут интересовать разработчиков (от "микроскопических" паразитных индуктивностей соединительных проводов до "макроскопических" эффективных

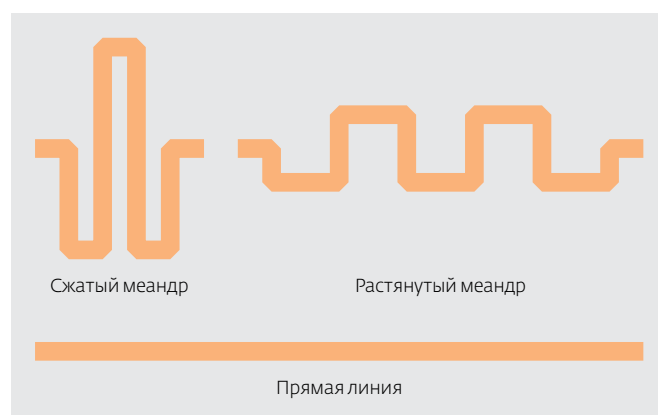
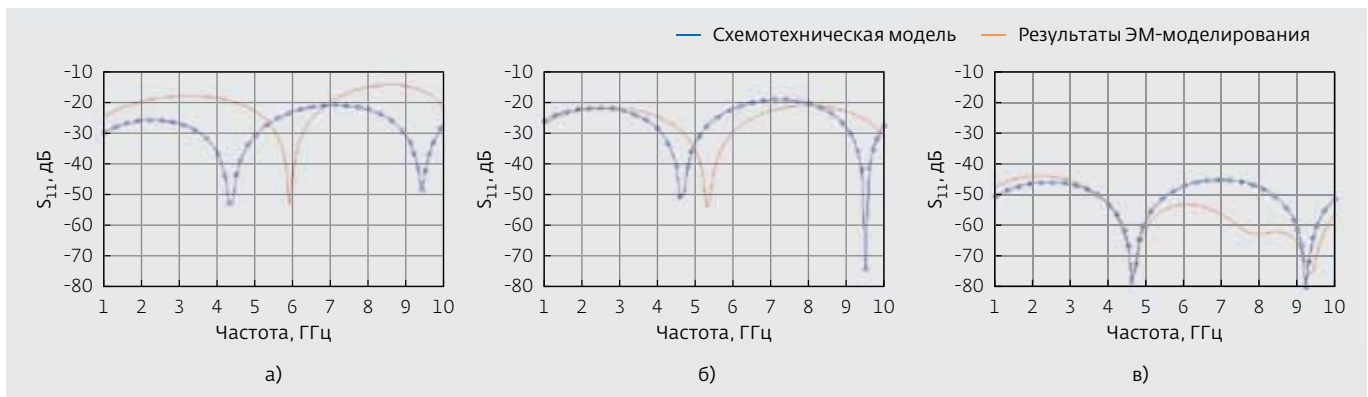


Рис.2. Три альтернативные структуры 50-омной микрополосковой линии длиной 0,5 дюйма

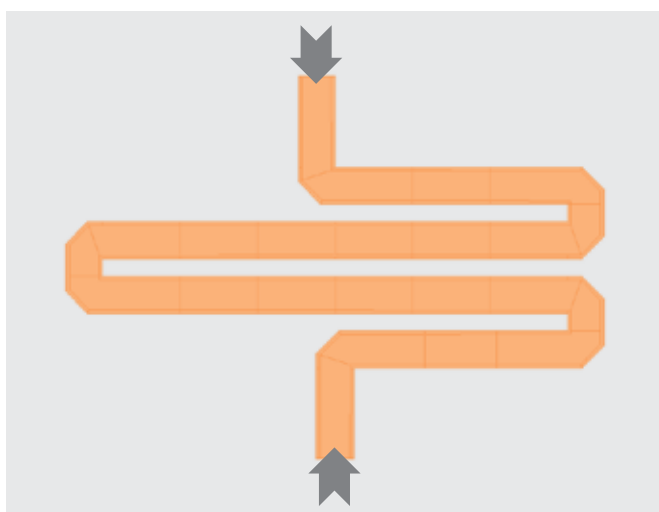


**Рис.3.** Сравнение обратных потерь по входу ( $S_{11}$ ), полученных по схематехнической модели и в результате ЭМ-моделирования: а) сжатый меандр; б) растянутый меандр; в) прямая линия длиной 0,5 дюйма

площадей отражения истребителя), не удивительно, что ни один из предложенных методов не удовлетворяет полностью требованиям всех приложений.

В последние годы в серийно выпускаемых САПР наибольшей популярностью пользуются три методики, основанные на методе моментов (Method of Moments – MoM), методе конечных элементов (Finite Element Method – FEM) и методе конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain – FDTD). В общих чертах, эти методы моделирования используют схожий подход к решению конкретных задач [1]. Процесс моделирования состоит из следующих ключевых шагов:

- создание физической модели. Создается топология и определяются свойства материальных объектов, использованных в этой топологии;
- настройка параметров ЭМ-моделирования. Определяется область моделирования



**Рис.4.** Типичная однородная сетка, используемая для моделирования по методу МоМ

и граничные условия, выбираются специальные опции моделирования;

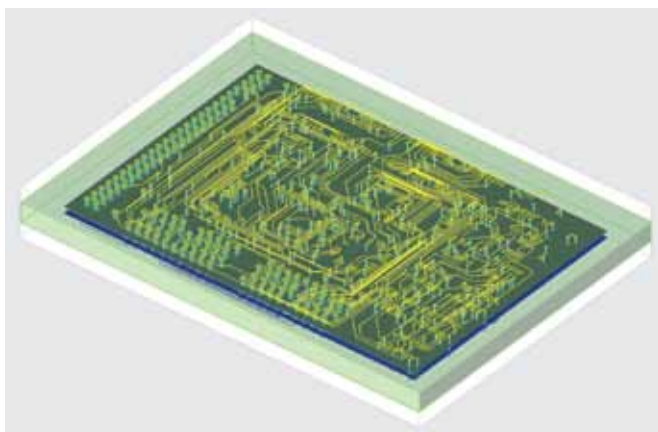
- выполнение ЭМ-моделирования. Физическая модель (топология) подвергается дискретизации путем разбиения сеткой на ячейки. Затем с помощью локальной функции (называемой еще функцией разложения, или базисной функцией) выполняется аппроксимация поля/тока в пределах ячейки. Коэффициенты функции настраиваются до удовлетворения граничным условиям;
- последующая обработка. Расчет S-параметров, характеристик излучения в дальней зоне и т.п.

Хотя общий процесс применения методов МоМ, FEM и FDTD достаточно схож, существуют некоторые важные отличия, которые делают каждый метод более подходящим для определенного типа приложений.

## МЕТОД МОМЕНТОВ

Метод моделирования МоМ (часто называемый "планарным 3D" методом) – один из наиболее сложных, поскольку требует тщательного расчета функций Грина [2].

Главным практическим преимуществом этого метода является то, что приходится дискретизировать (разбивать на ячейки) только металлические соединения моделируемой структуры, так как в качестве неизвестной величины выступает распределение тока на металлических поверхностях (в других методах главные неизвестные – обычно электрические/магнитные поля, присутствующие во всех местах пространства решений). В результате "планарная" сетка МоМ оказывается значительно проще и меньше, чем эквивалентная "объемная" сетка, необходимая для моделирования с применением методов FEM и FDTD. Сетка получается однородной (ячейки



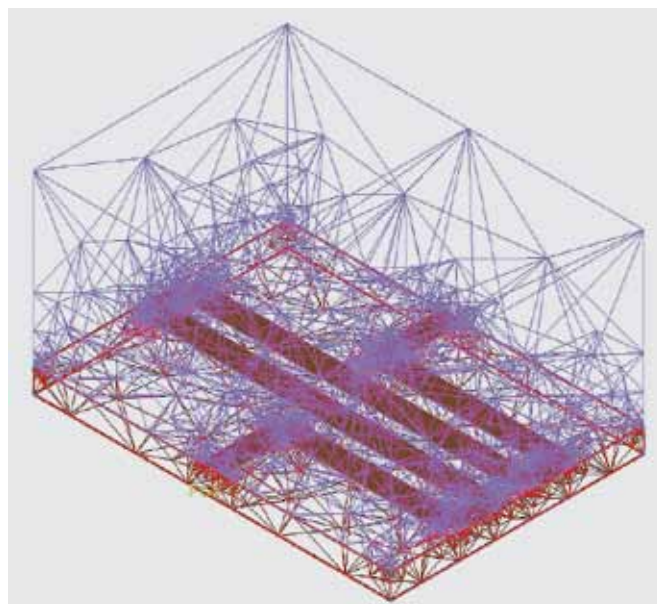
**Рис.5.** Топология печатной платы, которая легко моделируется с помощью метода МоМ

сетки создаются только на металлических соединениях) и состоит обычно из прямоугольных, треугольных или квадратных ячеек (рис.4).

Уменьшенное число ячеек сетки повышает эффективность моделирования. Поэтому МоМ хорошо подходит для анализа сложных (многослойных) структур. Еще одно его преимущество в том, что он использует лишь одну матрицу для всех входных портов. Другими словами, моделирование схем с большим числом портов не требует существенно большего времени.

Но у метода МоМ есть и недостатки. Он не подходит для произвольных трехмерных структур. Моделируемые структуры должны быть "планарными" по своей сути и образовывать многослойную структуру (расположенную в плоскости  $x-y$ ) или быть планарными объектами, расположенными в плоскости  $x-y$ , но вытянутыми по вертикали (вдоль оси  $z$ ) через несколько наложенных друг на друга слоев. Для многих ВЧ/СВЧ-устройств это ограничение не играет особой роли, поскольку они зачастую имеют именно планарную структуру. Представьте себе многослойную печатную плату или монолитную СВЧ ИС, которая обычно состоит из наложенных друг на друга слоев (диэлектрических слоев подложки) и соединительных проводников (металлических дорожек). Эти соединительные проводники проложены в плоскости  $x-y$  в разных местах подложки, а переходные отверстия между металлическими слоями можно считать плоскими объектами (в поперечном сечении), проходящими вертикально через несколько слоев подложки.

Типичным применением метода МоМ может быть получение детальной многопортовой модели  $S$ -параметров, представляющей все соединения печатной платы. Например, сравнительно



**Рис.6.** Типичная тетраэдрическая сетка, используемая в методе моделирования FEM

простую топологию (рис.5) можно охарактеризовать с помощью метода МоМ и применить полученную модель  $S$ -параметров в сочетании с моделью, представляющей дискретные компоненты, для моделирования всей печатной платы [3].

## МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Метод моделирования FEM является истинно объемным (3D) методом, выгодно отличающимся от МоМ тем, что его можно применять для анализа произвольных объемных структур, не ограничиваясь многослойными топологиями. Он требует помещения моделируемого объекта в "ящик", который ограничивает пространство и определяет область моделирования. Весь объем области моделирования дискретизируется с помощью сетки с тетраэдрическими ячейками, причем ближе к моделируемому объекту создается более плотная сетка (рис.6).

Главной неизвестной величиной в методе FEM является обычно величина поля. Поле аппроксимируется по всем тетраэдрам. Здесь, как и в методе МоМ, приходится работать лишь с одной матрицей для всех входных портов.

Типичное применение метода FEM – определение характеристик паразитного влияния корпуса ВЧ/СВЧ ИС. Например, метод можно использовать для оценки характеристик линии передачи между проводником печатной платы и контактной площадкой кристалла в корпусе QFN (рис.7). Модель корпуса/соединительной линии затем можно

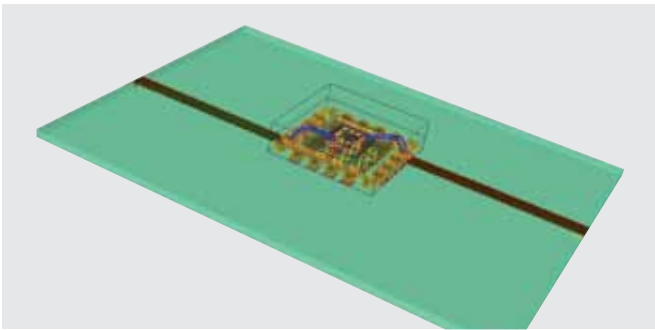


Рис.7. 3D-модель исследуемого QFN-корпуса

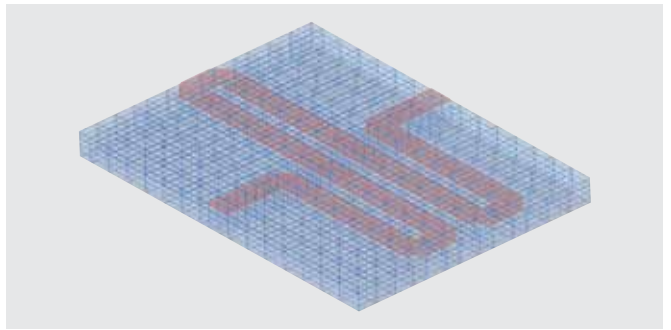


Рис.8. Типичная гексаэдрическая сетка, используемая в методе моделирования FDTD

объединить с моделью схемы ИС и оценить влияние корпуса на характеристики ИС.

Пожалуй, FEM можно признать самым гибким методом ЭМ-анализа, позволяющим моделировать большинство объемных структур. Однако для геометрически сложных структур требуется сетка с большим числом тетраэдрических ячеек. Это, в свою очередь, приводит к использованию огромных матриц, что может потребовать больших объемов компьютерной памяти.

### МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Подобно методу FEM, метод моделирования FDTD является истинно трехмерным и может применяться для анализа структур произвольной формы. Но если алгоритмы МоМ и FEM решают уравнения Максвелла косвенно через матрицы, то алгоритмы FDTD делают это в явной форме.

Весь объем области моделирования в методе FDTD дискретизируется, обычно с помощью сетки с гексаэдрическими ячейками (которые называются ячейками Yee [4]) (рис.8). FDTD использует алгоритм пошагового интегрирования по времени, который шаг за шагом обновляет значения



Рис.9. Оценка излучения антенны мобильного телефона – пример применения метода FDTD

поля в ячейке сетки, в явной форме отслеживая продвижение электромагнитных волн через моделируемую структуру.

Одним из существенных преимуществ этого метода по сравнению с FEM является то, что не требуется применения матриц, и в результате сложные проблемы часто можно решать с очень малым расходом компьютерной памяти. Кроме того, при выборе метода FDTD для ускорения моделирования удобно использовать возможности современных графических процессоров (GPU).

Однако наряду с преимуществами методу FDTD свойственны и некоторые недостатки. Так, для каждого присутствующего в топологии порта нужно выполнять отдельное моделирование, в результате схема с N портами потребует N моделирований. Это делает метод FDTD не слишком привлекательным для анализа схем с большим числом портов.

Характерное применение метода FDTD – определение характеристик антенны, встроенной в мобильный телефон (рис.9). Антенна может терять настройку при встраивании ее в телефон или при приближении телефона к человеческому телу. Раннее выявление таких эффектов может оказаться очень полезным.

### ВЫБОР "ПРАВИЛЬНОГО" МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Чтобы оценить пригодность того или иного метода ЭМ-анализа, нужно принять во внимание множество факторов. Конечно, некоторые из них выйдут за рамки простого сравнения алгоритмов и могут включать другие показатели, определяющие эффективность процесса проектирования.

- Насколько просто создается геометрическая модель?
- Насколько просто среда ЭМ-моделирования сопрягается со средствами схемотехнического моделирования?

- Нужно ли быть экспертом в области ЭМ-моделирования, чтобы воспользоваться этими средствами?

Ответы на подобные вопросы выходят за рамки настоящей статьи и имеют субъективный характер. Поэтому сосредоточимся на некоторых ключевых факторах, которые нужно учитывать при выборе метода моделирования (МоМ, FEM или FDTD), наилучшим образом подходящего для конкретного приложения.

Во-первых, надо решить, можно ли считать геометрию "планарной" по природе или она истинно "объемная". Для "планарных" структур лучше всего подходит метод МоМ, и поэтому именно его рекомендуется использовать для анализа разводки печатных плат, пассивных элементов и соединений ИС и планарных антенн. Для истинно "объемных" структур, таких как переходные соединения (коаксиальная линия-микрострипковая линия, коаксиальная линия-волновод и т.п.), разъемы, корпуса, объемные резонаторы, волноводы или объемные антенны, больше подходят методы FEM или FDTD.

Другой важный фактор, который нужно учитывать, – тип амплитудно-частотной характеристики исследуемой цепи. Методы МоМ и FEM хорошо работают в частотной области, что делает их более пригодными, чем метод FDTD, для анализа цепей с большой добротностью. Примеры цепей, попадающих в эту категорию, могут включать фильтры, объемные резонаторы, генераторы и т.п. С другой стороны, метод FDTD хорошо работает во временной области, а это значит, что его удобно применять для рефлектометрии во временной области (Time Domain Reflectometry – TDR) на разъемах и переходных соединениях.

В случае истинно "объемной" геометрии нужно также учитывать сложность схемы (размер сетки и число портов). Метод FEM наиболее эффективен для моделирования схем с большим числом портов. В качестве примера таких структур можно привести корпуса ИС и многокристальные модули. С другой стороны, если геометрия содержит лишь небольшое число портов, то наиболее эффективным с точки зрения использования памяти будет метод FDTD. Приложения, подходящие для применения метода FDTD, включают анализ положения антенн на автомобилях и воздушных судах, а также исследование характеристик антенн в непосредственной близости от человеческого тела.

Итак, в статье предпринята попытка показать, что с ростом степени интеграции и уменьшением размеров корпусов ИС применение замкнутых

аналитических моделей отдельных модулей не всегда обеспечивает достаточную эффективность моделирования. Практический подход к решению этой проблемы заключается в применении ЭМ-моделирования. Сегодня не существует универсального метода расчета ЭМ-полей, пригодного "на все случаи жизни", однако знание особенностей различных методов поможет выбрать из них оптимальный для решения конкретной задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Swanson Jr D.G., Hoefler W.J.R.** Microwave Circuit Modelling Using Electromagnetic Field Simulation. – Artech House.
2. **VanHese J, Sercu J, Pissort D, Lee H-S.** State of the Art in EM Software for Microwave Engineers. – Agilent Technologies Application Note 5990-3225EN, February 2009.
3. **Morris D.J.** Virtual RF PCB Prototypes. – Printed Circuit Design & Fab, June 2006.
4. **Yee K.S.** Numerical Solution of Initial Boundary-Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. – IEEE Trans. Ant. Prop., 1996, v.AP-14, №5, p.302–307.